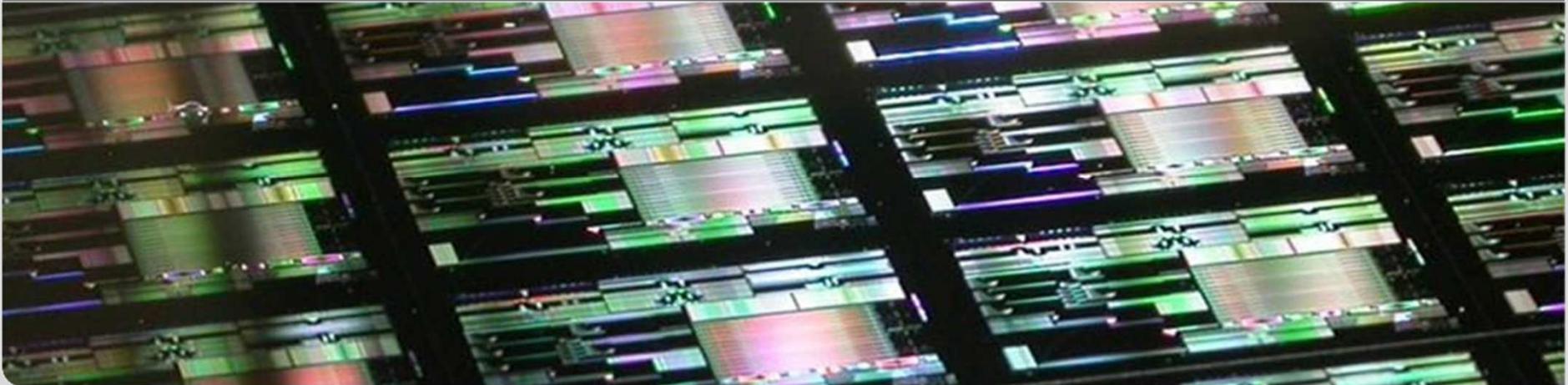


HLB Übung 3

WS 2015/2016

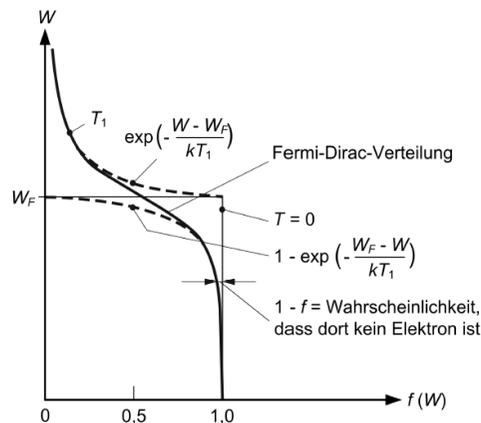
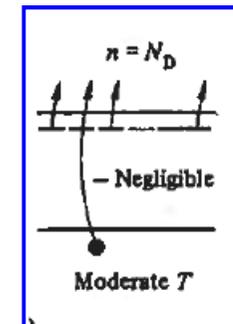


Aufgabe 1) Si-Halbleiterprobe

Eine Probe aus Silizium ist n-dotiert mit $n_D = 1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ und befindet sich auf Raumtemperatur $T = 300 \text{ K}$. Die Eigenleitungsträgerdichte beträgt $n_i = 1.5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$.

- a) Nehmen Sie an, dass das Donatorniveau weit oberhalb der Fermi-Energie liegt und dass damit Störstellenerschöpfung vorliegt. Wie groß ist die Majoritäts- und Minoritätsträgerdichte in diesem Fall?

- Störstellenerschöpfung \rightarrow Alle Störstellen sind ionisiert $\rightarrow n_D^+ = n_D$
 Donatorniveau liegt weit über Fermi-Energie $\rightarrow n_D^+ = n_D$



$$n_D^+ = n_D [1 - f_D(W_D)] = \frac{n_D}{1 + 2 \exp\left(\frac{W_F - W_D}{kT}\right)},$$

- Ladungsneutralität $n + n_A^- = p + n_D^+$
- Massenwirkungsgesetz $n \cdot p = n_i^2$

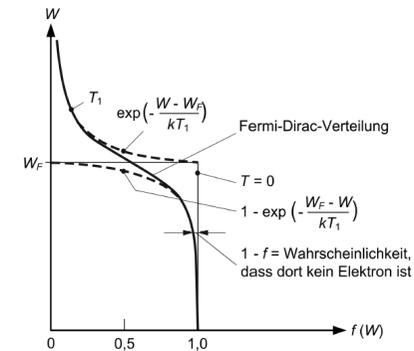
Aufgabe 1) Si-Halbleiterprobe

Eine Probe aus Silizium ist n-dotiert mit $n_D = 1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ und befindet sich auf Raumtemperatur $T = 300 \text{ K}$. Die Eigenleitungsträgerdichte beträgt $n_i = 1.5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$.

b) Nehmen Sie nun an, dass der energetische Abstand zwischen Donatorniveau und Fermi-Niveau nur noch $(W_D - W_F) = 2kT$ beträgt. Wie groß ist die Majoritäts- und Minoritätsträgerdichte jetzt?

- Keine Störstellenerschöpfung mehr

$$n_D^+ = n_D [1 - f_D(W_D)] = \frac{n_D}{1 + 2 \exp\left(\frac{W_F - W_D}{kT}\right)},$$



- Ladungsneutralität $n + n_A^- = p + n_D^+$

- Massenwirkungsgesetz $n \cdot p = n_i^2$

Aufgabe 1) Si-Halbleiterprobe

Eine Probe aus Silizium ist n-dotiert mit $n_D = 1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ und befindet sich auf Raumtemperatur $T = 300 \text{ K}$. Die Eigenleitungsträgerdichte beträgt $n_i = 1.5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$.

- c) Berechnen Sie für den in b) beschriebenen Fall den Abstand des Fermi-Niveaus von der Leitungsbandkante. Die effektive Zustandsdichte des Leitungsbandes in Silizium beträgt $N_L = 3,2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$.

Ladungsträgerdichte im Leitungsband
$$n = N_L \exp\left(-\frac{W_L - W_F}{kT}\right)$$

- d) Berechnen Sie für den in c) genannten Fall die Besetzungswahrscheinlichkeit eines Leitungsbandzustandes an der Bandkante. Vergleichen Sie das Ergebnis mit der Besetzungswahrscheinlichkeit eines Donatorzustandes. Erklären Sie, warum im Leitungsband signifikante Elektronendichten vorliegen, obwohl dieses energetisch sogar noch über den quasi unbesetzten Donatoren liegt.

Fermi-Dirac-Verteilung:
$$f_{FD}(W) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{W - W_F}{kT}\right)}$$

Aufgabe 2) Fermi-Niveau und Trägerverteilung

Es werden die Besetzungswahrscheinlichkeiten für Elektronen im Leitungsband und Löcher im Valenzband von einem Material im thermischen Gleichgewicht betrachtet. Man findet in dem betrachteten Material, dass die Besetzungswahrscheinlichkeit für Elektronenzustände an der Leitungsbandkante gerade gleich groß ist wie die Wahrscheinlichkeit, dass ein Zustand, der kT unterhalb der Valenzbandkante liegt, mit einem Loch besetzt ist. Gehen Sie im Folgenden davon aus, dass die Boltzmann-Näherung gültig ist.

Berechnen Sie die Lage des Fermi-Niveaus relativ zur Mitte der Bandlücke. Gesucht ist ein formaler Ausdruck. Welche zwei Möglichkeiten gibt es für Temperaturen $T > 0$ K, die Abweichung des Fermi-Niveaus von der Mitte der Bandlücke zu erklären?

$$\text{Fermi-Dirac-Verteilung } f_{FD}(W) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{W - W_F}{kT}\right)} \quad \text{Boltzmann-Verteilung } f_B(W) = \exp\left(-\frac{W - W_F}{kT}\right)$$

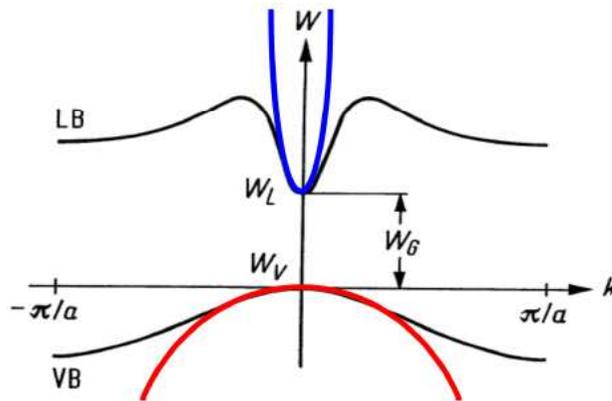
Aufgabe 2) Fermi-Niveau und Trägerverteilung

- Für intrinsischen Halbleiter

$$W_{F.} = \frac{1}{2}(W_V + W_L) + kT \ln \sqrt{\frac{N_V}{N_L}} = \frac{1}{2}(W_V + W_L) + \frac{3}{4}kT \ln \left(\frac{m_p}{m_n} \right)$$

→ Im Beispiel hat Leitungsband größere effektive Masse

Wo würde die Fermi-Energie für diesen intrinsischen Halbleiter liegen?



$$\frac{1}{m^*} = \frac{1}{\hbar^2} \frac{\partial^2 W}{\partial k^2}$$

Leitungsband hat größere Krümmung → kleinere effektive Masse

→ Fermi-Niveau liegt näher an Leitungsband

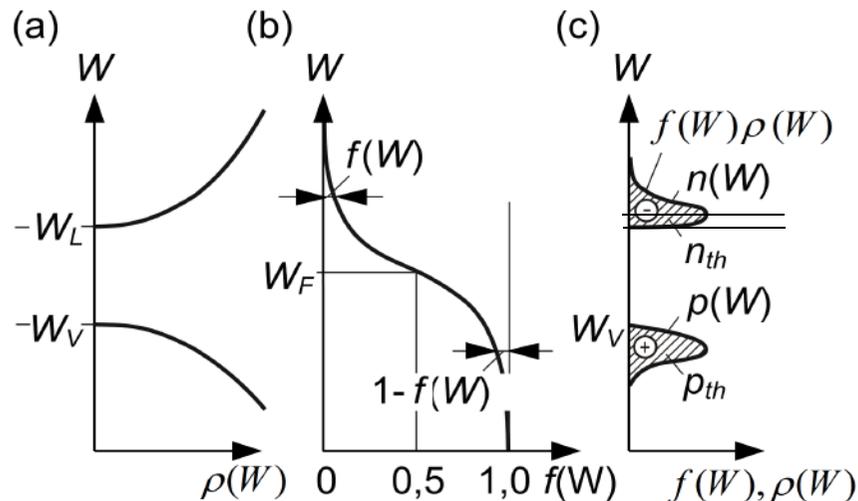
Aufgabe 3) Maximum der Elektronenverteilung

Wenn man die Zustandsdichte und die Besetzungswahrscheinlichkeiten für Elektronen im Leitungsband kennt, kann man die Verteilung der Elektronen als Funktion der Energie berechnen. Wie weit ist das Maximum dieser Verteilung von der Leitungsbandkante entfernt? Gesucht ist ein formaler Ausdruck. Gehen Sie davon aus, dass die Boltzmann-Näherung gültig ist.

$$\rho_n(W) = 4\pi \frac{(2m_n)^{\frac{3}{2}}}{h^3} \sqrt{W - W_L}$$

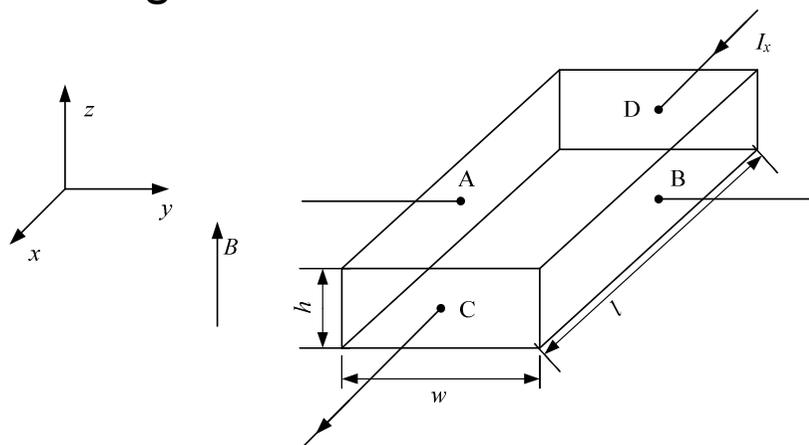
$$f(W) \approx e^{-\frac{(W - W_F)}{kT}}$$

$$n(W) = \rho_n(W) \cdot f_n(W)$$



Aufgabe 4) Hall-Effekt

Gegeben sei ein dotierter Halbleiter mit Breite $w=2\text{ mm}$, Höhe $h=1\text{ mm}$ und Länge $l=5\text{ mm}$. Es liegt ein Magnetfeld mit einer Flussdichte $B=40\text{ mT}$ in z -Richtung vor (siehe Skizze) und es fließt ein Strom $I_x=10\text{ mA}$ der Länge nach in $+x$ -Richtung durch den Halbleiter. Zwischen den Seitenflächen A und B wird eine Spannung gemessen $U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B = 1\text{ mV}$ während die Spannung zwischen den Flächen D und C $U_{DC}=500\text{ mV}$ beträgt.

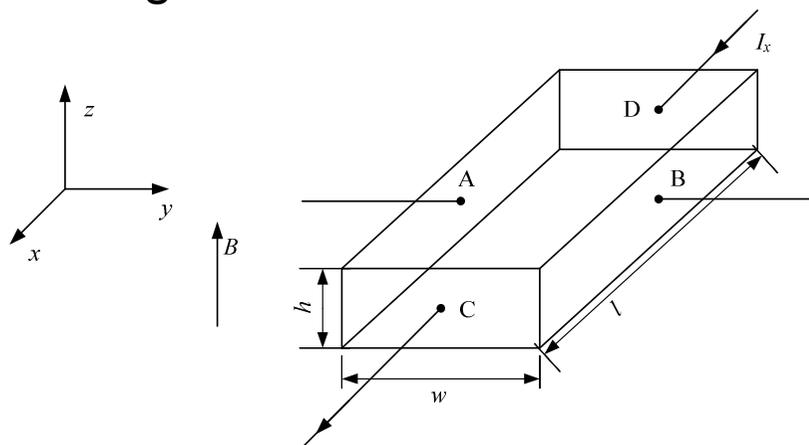


1. Spannung $U_{DC} \rightarrow$ Majoritätendriftstrom
2. Majoritäten werden durch Magnetfeld abgelenkt
3. Majoritäten sammeln sich am Rand \rightarrow Erzeugt Hall-Spannung
4. Elektrisches Feld der Hallspannung wirkt Ablenkung entgegen
5. Konstante Spannung stellt sich ein
6. Durch Vorzeichen der Spannung lässt sich die Art der Dotierung bestimmen

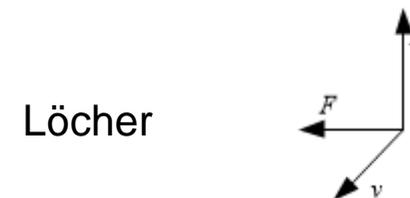
a) Welche Art der Dotierung liegt im Halbleiter vor?

Aufgabe 4) Hall-Effekt

Gegeben sei ein dotierter Halbleiter mit Breite $w=2\text{ mm}$, Höhe $h=1\text{ mm}$ und Länge $l=5\text{ mm}$. Es liegt ein Magnetfeld mit einer Flussdichte $B=40\text{ mT}$ in z -Richtung vor (siehe Skizze) und es fließt ein Strom $I_x=10\text{ mA}$ der Länge nach in $+x$ -Richtung durch den Halbleiter. Zwischen den Seitenflächen A und B wird eine Spannung gemessen $U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B = 1\text{ mV}$ während die Spannung zwischen den Flächen D und C $U_{DC}=500\text{ mV}$ beträgt.



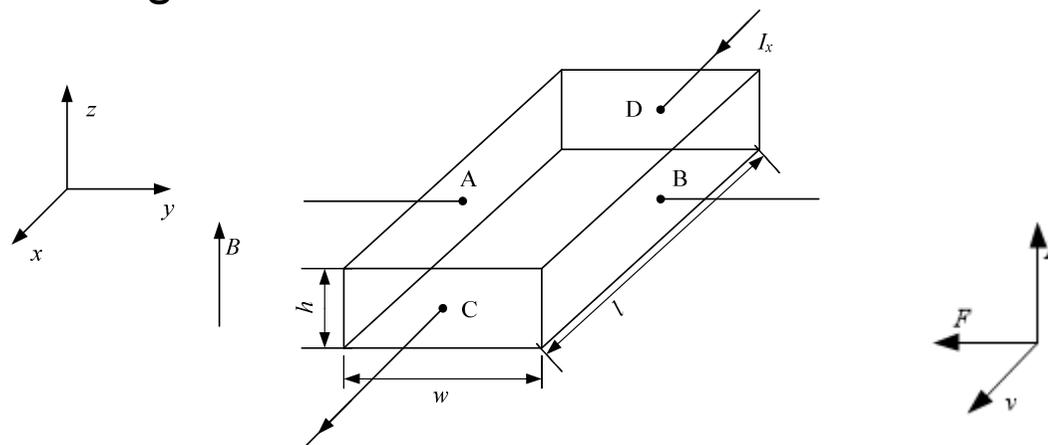
Lorentzkraft $\vec{F}_L = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$



a) Welche Art der Dotierung liegt im Halbleiter vor?

Aufgabe 4) Hall-Effekt

Gegeben sei ein dotierter Halbleiter mit Breite $w=2\text{ mm}$, Höhe $h=1\text{ mm}$ und Länge $l=5\text{ mm}$. Es liegt ein Magnetfeld mit einer Flussdichte $B=40\text{ mT}$ in z -Richtung vor (siehe Skizze) und es fließt ein Strom $I_x=10\text{ mA}$ der Länge nach in $+x$ -Richtung durch den Halbleiter. Zwischen den Seitenflächen A und B wird eine Spannung gemessen $U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B = 1\text{ mV}$ während die Spannung zwischen den Flächen D und C $U_{DC}=500\text{ mV}$ beträgt.



Lorentzkraft $\vec{F}_L = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$

Driftstrom der Majoritäten

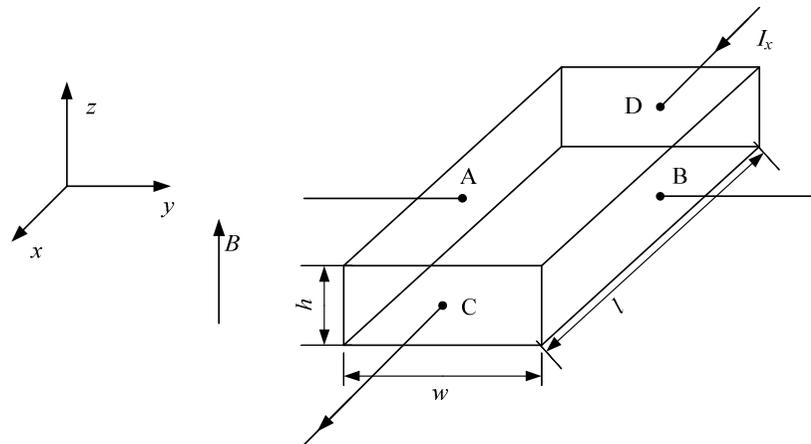
$$J_{p,x} = epv_{p,x}$$

$$\text{mit } v_{p,x} = \mu_p E_x$$

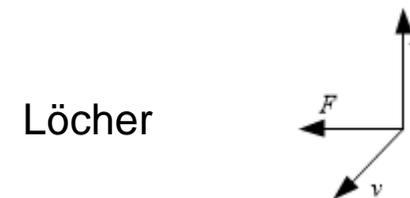
- b) Berechnen Sie die Beweglichkeit der Majoritätsträger in dieser Probe. Wie groß ist die Ladungsträgerdichte?

Aufgabe 4) Hall-Effekt

- c) Berechnen Sie die sich im stationären Zustand einstellende Hall-Spannung für den Fall eines undotierten Halbleiters bei dem Elektronen und Löcher unterschiedliche Beweglichkeiten aufweisen. Gehen Sie davon aus, dass die y -Komponente J_y der Stromdichte den Wert null annimmt, da sich Elektronen- und Löcherströme gerade kompensieren. Gehen Sie davon aus, dass die Ladungsträgerdichte im Halbleiter konstant ist und somit keine Diffusionsströme auftreten.



Lorentzkraft $\vec{F}_L = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$



ges.: Hall Spannung U_H für undotierten Fall $U(\mu_n, \mu_p)$